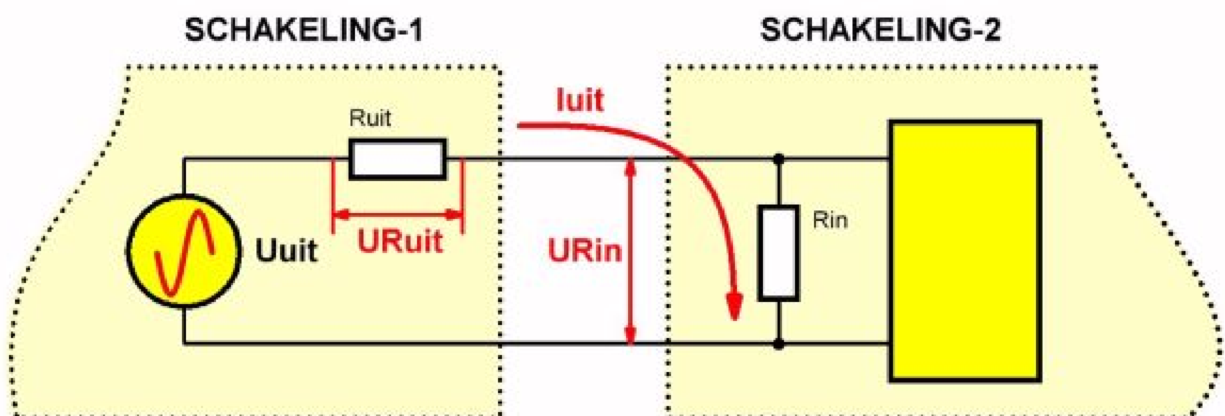
Bufferversterkers

Bufferversterkers zijn schakelingen die geen spanningsversterking opleveren, maar stroom of vermogen versterken. U kunt een buffer bijvoorbeeld gebruiken als eindtrap in een zelfgebouwde generator, zodat de uitgang een zeer lage weerstand krijgt en stroom kan leveren zonder dat de spanning in elkaar zakt.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 25-09-2018

Waarom een bufferversterker?

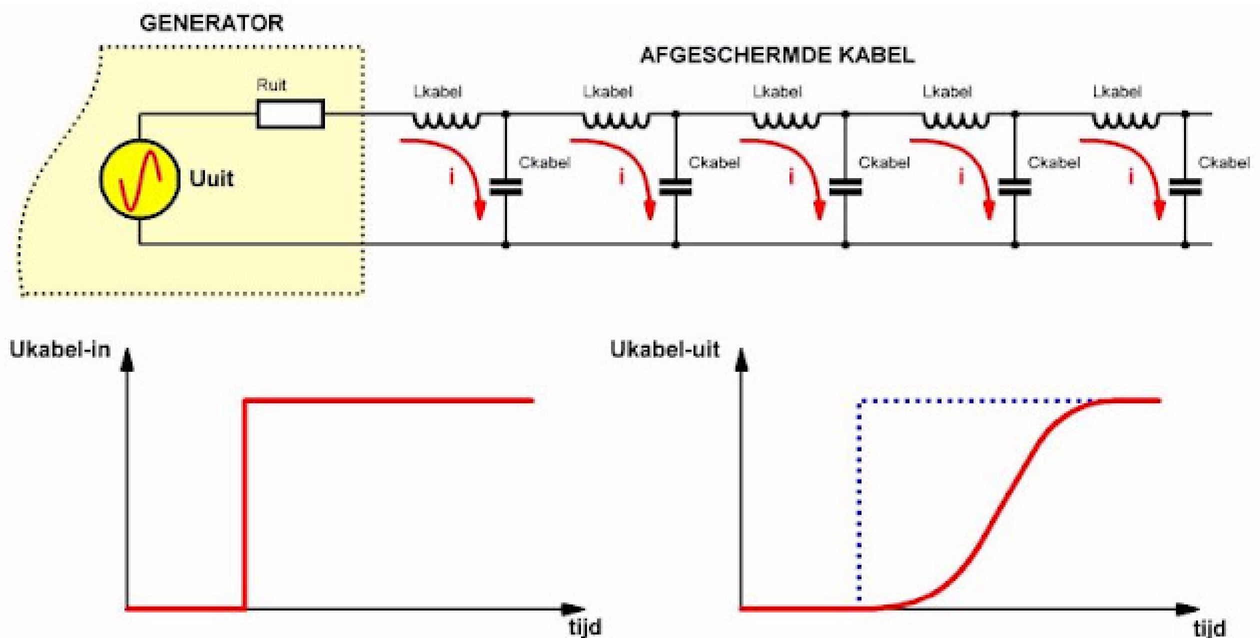
Een lage uitgangsweerstand is noodzakelijk
U kunt de uitgang van gelijk welke elektronische schakeling voorstellen door de serieschakeling van een weerstandsloze spanningsbron U_{uit} en een weerstand R_{uit}. Als u de uitgangsspanning meet met een universeelmeter of oscilloscoop met een zeer hoge ingangsweerstand is er niets aan de hand. U meet de spanning U_{uit} van de spanningsbron. Het wordt anders als u de schakeling aansluit op de ingang van een volgende schakeling. U kunt namelijk de ingang van gelijk welke elektronische schakeling voorstellen door een weerstand R_{in}, die parallel over de ingangsklemmen is geschakeld. Deze weerstand stelt de ingangsweerstand van de schakeling voor. In onderstaande figuur is getekend wat er dan gebeurt. Er gaat een bepaalde stroom I_{uit} door de verbinding tussen beide schakelingen lopen. Deze stroom wekt over beide in serie geschakelde weerstanden spanningsvallen op. U ziet onmiddellijk dat:
$U_{uit} = U_{Ruit} + U_{Rin}$
Kortom, de reële uitgangsspanning van SCHAKELING-1 is nu niet meer gelijk aan U_{uit}, de onbelaste spanning, maar is lager. Men noemt de belaste spanning van een schakeling de *'klemspanning'*. Hoe hoger de uitgangsweerstand van de eerste schakeling, hoe meer invloed de tweede schakeling op de uitgangsspanning krijgt.
Wilt u dat niet, dan zit er maar één ding op: de waarde van R_{uit} zo klein mogelijk maken. Daarvoor kunt u een bufferversterker toepassen achter de eerste schakeling.



SCHAKELING-1 wordt belast door SCHAKELING-2. (© 2018 Jos Verstraten)

Capacitieve belastingen zijn funest
Vaak sluit u een schakeling af met een afgeschermde kabel. Zo'n kabel is niet wat het lijkt,

een draadje koper met op een bepaalde afstand een afschermingskous er om heen. Volgens de theoretische elektriciteitsleer kunt u een afgeschermde kabel voorstellen als een serieschakeling van een groot aantal LC-netwerkjes, zoals voorgesteld in onderstaande figuur.
Een afgeschermde kabel vormt dus een capacitieve belasting voor uw schakeling. Als deze schakeling een snelle puls moet leveren, dan komt u in de problemen als uw schakeling een hoge uitgangsweerstand heeft. Uw schakeling moet namelijk op het moment dat de uitgangsspanning omschakelt van 'L' naar 'H' voldoende stroom en vermogen kunnen leveren om al die kleine kabelcapaciteitjes zo snel mogelijk op te laden. Als dat niet het geval is zal er van uw mooie puls aan het begin van de kabel niet erg veel overblijven. De puls verschijnt niet alleen erg vertraagd op de uitgang van de kabel, maar bovendien is van de steile voorflank niet veel over.
Ook hier moet u een bufferversterker met een zo laag mogelijke uitgangsweerstand gebruiken om uw puls zo onvervormd als maar mogelijk is door de kabel te sturen.



Wat er gebeurt als u een steile puls door een afgeschermde kabel stuurt. (© 2018 Jos Verstraten)

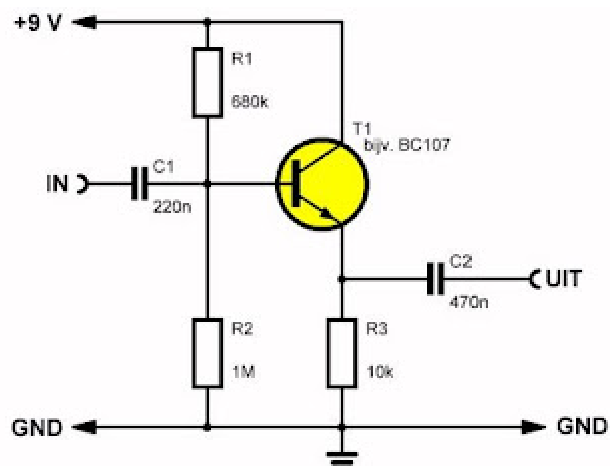
Waaraan moet een bufferversterker voldoen?
Uit de twee voorgaande voorbeelden kunt u al een lijstje met eisen opstellen waaraan een goede bufferversterker moet voldoen.

- De spanningsversterking moet gelijk zijn aan een. De buffer mag het uitgangssignaal van uw schakeling immers zo min mogelijk veranderen.
- De bandbreedte moet zo groot mogelijk zijn en wel om dezelfde reden. Als u een blokgolf van 100 kHz in een buffer stuurt, moet die er als dusdanig weer uitkomen en dat kan alleen als de buffer een grote bandbreedte heeft.
- De uitgangsweerstand moet zo laag mogelijk zijn.
- De uitgangsstroom moet zo groot mogelijk zijn.

Bufferversterkers met transistoren

De emittervolger als eenvoudigste buffer
Als u een buffer met een transistor wilt samenstellen komt alleen de *'geaarde collector schakeling'* in aanmerking. De basisschakeling, ook wel emittervolger genoemd, is getekend in onderstaande figuur.
De collector is rechtstreeks verbonden met de voedingsspanning. De transistor wordt

ingesteld door middel van een weerstandsdeler R1/R2 in de basis. Deze weerstanden moeten zo hoogohmig mogelijk zijn, maar u moet er wel op letten dat de stroom die door de weerstanden vloeit ongeveer tien keer groter is dan de basisstroom van de transistor. De weerstandsdeler moet u zó experimenteel bepalen dat de spanning op de emitter gelijk is aan de helft van de voedingsspanning.
Het wisselspanningssignaal wordt via de scheidingscondensator C1 aangeboden aan de basis en via de scheidingscondensator C2 afgenomen van de emitter.

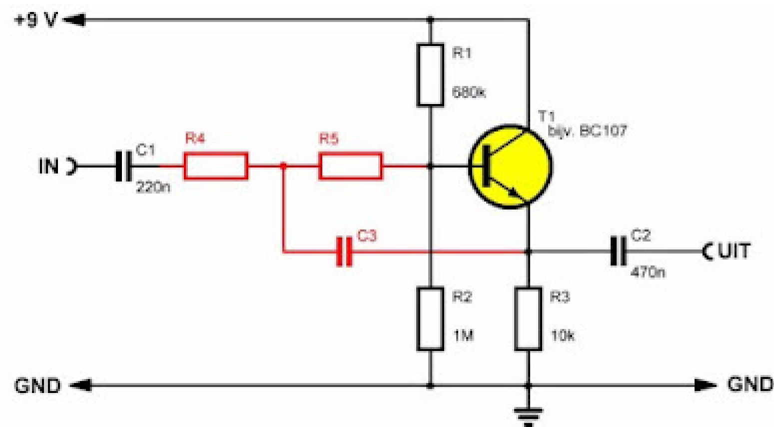


De eenvoudigste buffer, de emittervolger. (© 2018 Jos Verstraten)

Eigenschappen van de emittervolger
De emittervolger heeft de onderstaande eigenschappen.

- **Spanningsversterking:**
  De spanningsversterking voor wisselspanning is gelijk aan 1, of nauwkeuriger, 0,99. Er bestaat dus een zeer klein verschil tussen de grootte van het ingangssignaal op de basis en de grootte van het uitgangssignaal op de emitter, maar dit verschil is nauwelijks meetbaar.
- **Fase:**
  Het signaal op de uitgang is in fase met het signaal op de ingang.
- **Ingangsweerstand:**
  Deze parameter is groot en wordt hoofdzakelijk bepaald door de vervangingsweerstand van de parallel geschakelde weerstanden R1 en R2. Als u deze weerstanden erg groot maakt moet u er wel rekening mee houden dat de weerstand van de basis/emitter-kring, welke ongeveer gelijk is aan 500 kΩ, ook een rol speelt. In ieder geval kunt u stellen dat de signaalbron nauwelijks belast wordt door de emittervolger.
- **Uitgangsweerstand:**
  Deze is heel laag en ligt in de grootte-orde van 10 Ω.

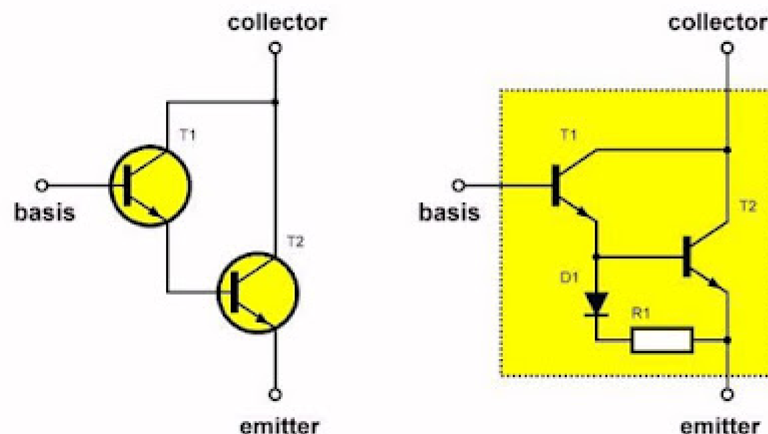
Het bootstrap principe
De ingangsweerstand van een emittervolger is hoog, vergeleken met andere transistorschakelingen, maar uiteraard zeer laag vergeleken met een op-amp geschakeld als buffer. Vandaar dat men heeft gezocht naar mogelijkheden om de ingangsweerstand van een emittervolger hoger te maken. Dat kunt u vrij eenvoudig doen door gebruik te maken van het zogenaamde *'bootstrap principe'*. In het algemeen komt dit principe er op neer dat u een versterkt uitgangssignaal, dat in fase is met een ingangssignaal, zuiver capacitief naar de ingang terugkoppelt. Hierdoor kan de schijnbare ingangsweerstand met een factor honderd stijgen. Hoe dit principe bij een emittervolger gerealiseerd kan worden toont onderstaande figuur. Het uitgangssignaal, de spanning op de emitter, wordt via de condensator C3 teruggekoppeld naar de ingang. Tussen de ingang en de basis is een weerstandsdeler opgenomen. De condensator C3 moet een hele hoge waarde hebben, in ieder geval zo'n hoge waarde dat de weerstand van het onderdeel voor alle signaalfrequenties te verwaarlozen is.



Een emittervolger met bootstrapping. (© 2018 Jos Verstraten)

De werking van de bootstrapping
De werking is vrij eenvoudig te verklaren. Stel dat u op de ingang een signaal met een frequentie van 1 kHz aanbiedt. Dit signaal belandt op de basis van de emittervolger en via de werking van de geaarde collector schakeling ook op de emitter. Via dit punt met een zeer lage weerstand wordt het 1 kHz signaal via de bootstrap condensator C3 teruggekoppeld naar het knooppunt tussen beide weerstanden. Omdat de emittervolger zo goed als één maal versterkt en zowel de emitter als C3 een zeer lage weerstand hebben, zal op het knooppunt van beide weerstanden een signaalspanning ontstaan die op een fractie na even groot is als de ingangsspanning. Bovendien zijn beide signalen in fase. Het gevolg is dus dat over de weerstand R4 zo goed als geen signaal staat. Beide aansluitingen staan immers op ongeveer dezelfde spanning. Als er over een weerstand nauwelijks spanning staat, dan zal er ook nauwelijks stroom doorheen vloeien. Het gevolg is dat het signaal op de ingang een zeer hoge weerstand 'ziet'.
Dank zij het bootstrap principe kunt u de schijnbare ingangsweerstand van een emittervolger opvoeren tot in het MΩ bereik.

De darlington
Een andere methode waarmee u de ingangsweerstand van een emittervolger kunt opvoeren is gebruik te maken van het *'darlington principe'*. Een darlington is in feite niets anders dan een combinatie van twee emittervolgers. Het basisschema is getekend in onderstaande figuur links.
De darlington-combinatie kunt u behandelen als een gewone transistor. De totale stroomversterking is gelijk aan het product van de stroomversterkingen van beide transistoren:
$\beta_{totaal} = \beta_{T1} \bullet \beta_{T2}$
Als beide transistoren identiek zijn en een stroomversterkingsfactor van 250 hebben, wordt de totale stroomversterking dus gelijk aan 62.500! Het gevolg is dat u de weerstanden in de basis heel hoogohmig kunt maken en een van de belemmerende factoren voor het verkrijgen van een zeer hoge ingangsweerstand wegvalt. Ook de basis/emitter-weerstand van de eerste trap wordt nu schijnbaar verhoogd, zodat ook dit geen belemmering is voor een hoge ingangsweerstand.



Het principe van een darlington (links) en een praktische schakeling (rechts).
(© 2018 Jos Verstraten)

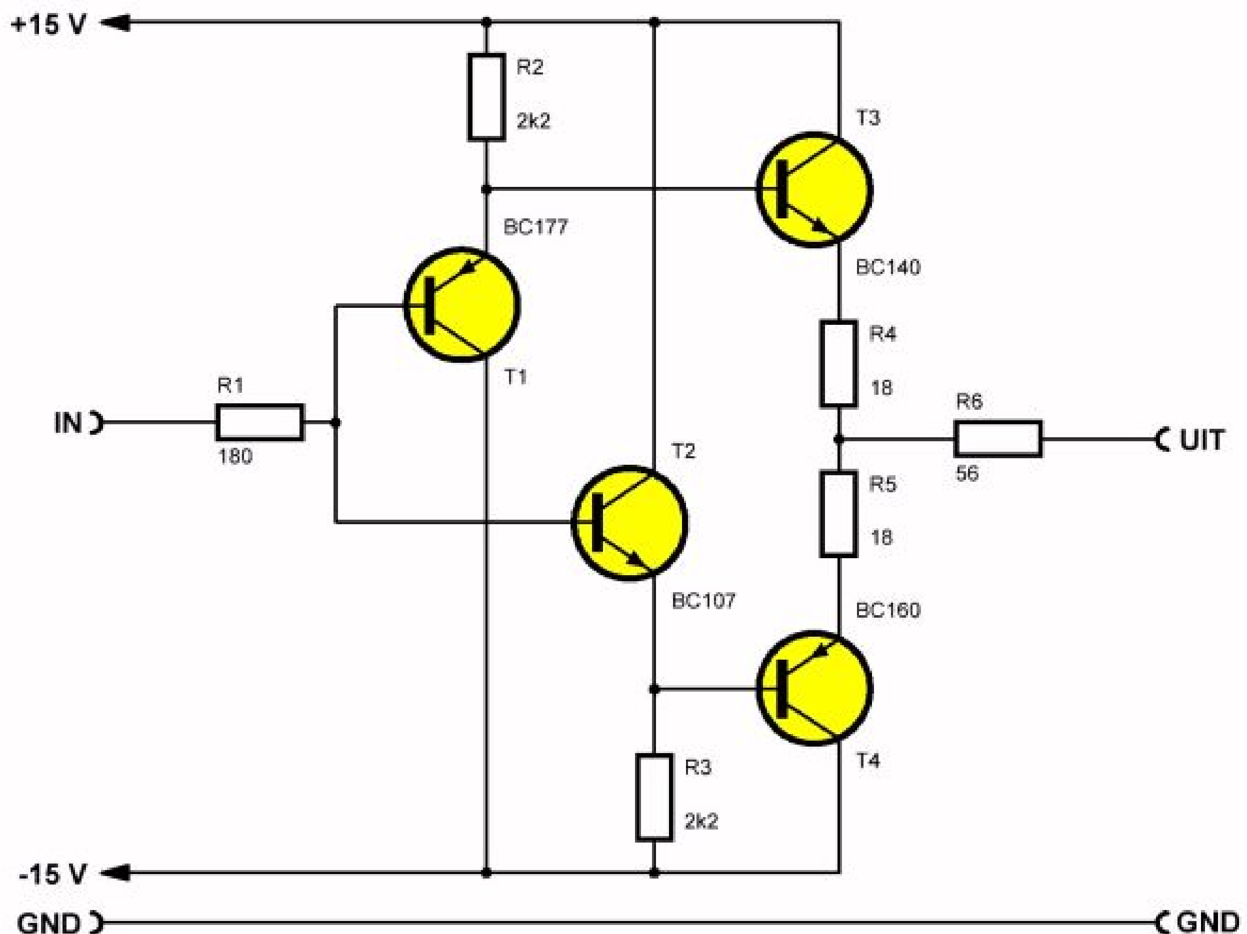
U kunt uiteraard een darlington samenstellen uit discrete transistoren, maar zij worden ook als dusdanig op de markt gebracht. In de meeste gevallen is dan, volgens het schema van bovenstaande figuur rechts, een diode-netwerkje aanwezig, waarmee de instelling van de basis/emitter-spanning van de eindtransistor wordt verzorgd. Deze diode heeft echter nog een tweede belangrijke functie. Zoals u weet verloopt de stroomversterking van een transistor in functie van de temperatuur. Bij een darlington krijgt u uiteraard erg veel last van dit verloop. Als de diode in goed thermisch contact staat met de transistoren (hetgeen bij integratie uiteraard vanzelfsprekend is) zal de variatie in de geleidingsspanning van de diode in functie van de temperatuur het geheel stabiliseren. Het temperatuurverloop van de stroomversterking wordt dan tegengewerkt door het verloop in de diodespanning.

PNP/NPN darlington
De eenvoudige darlington bestaat uit twee transistoren van dezelfde polariteit, dus 2 x PNP of 2 x NPN. Men biedt echter ook super-darlingtons aan, waarvan het intern schema getekend is in onderstaande figuur. Deze bestaan uit een PNP-transistor in de ingang, gevolgd door twee NPN-halfgeleiders (of vice versa). De totale stroomversterking van zo'n combinatie wordt gegeven door de uitdrukking:
$\beta totaal = \beta 1 \bullet (1+\beta 2) \bullet (1+\beta 3)$
Als de drie transistoren een stroomversterking van 250 hebben, wordt de stroomversterking van de super-darlington meer dan 15 miljoen! Dit is te vergelijken met de open-lus versterking van een normale operationele versterker.

De interne structuur van een super-darlington.
(© 2018 Jos Verstraten)

De symmetrische buffer
Tot slot van de behandeling van transístorbuffers wordt nog gewezen op een bijzondere schakeling, die erg goede eigenschappen heeft, zeer eenvoudig in elkaar steekt en uitermate betrouwbaar werkt. De symmetrische buffer van onderstaande figuur heeft een spanningsversterking van precies één, een zeer grote stroomversterking en een bandbreedte van tientallen MHz.
De schakeling bevat twee NPN/PNP-combinaties, die gevoed worden uit symmetrische voedingsspanningen. Hoewel de ingangsweerstand van het systeem niet bijzonder hoog is, kan deze schakeling overal gebruikt worden waar een laagfrequent signaal via een lange kabel verbonden moet worden met een apparaat. Te denken valt bijvoorbeeld aan de verbinding tussen een mengpaneel en diverse eindversterkers, die zijn gemonteerd in of bij de luidsprekerboxen. Als u de uitgangen van het mengpaneel met dergelijke buffertjes afsluit kunt u er zeker van zijn dat het signaal onvervormd en vrij van externe beïnvloeding bij de eindversterkers terecht komt.

De in het schema ingetekende weerstand R6 is in feite overbodig, maar wordt hier gebruikt om de uitgang de gestandaardiseerde uitgangsweerstand van 50 Ω te geven. Als u een lagere weerstand wilt, kunt u deze weerstand verlagen of zelfs weglaten. De emitter-weerstanden R4 en R5 zorgen voor de temperatuurstabilisatie van het systeem. Zou de stroom door de uitgangstrap T3/T4 stijgen, dan valt er meer spanning over deze weerstanden waardoor de basis/emitter-spanning vermindert en de transistoren minder in geleiding worden gestuurd. De stroomstijging wordt op deze manier automatisch tegengewerkt.

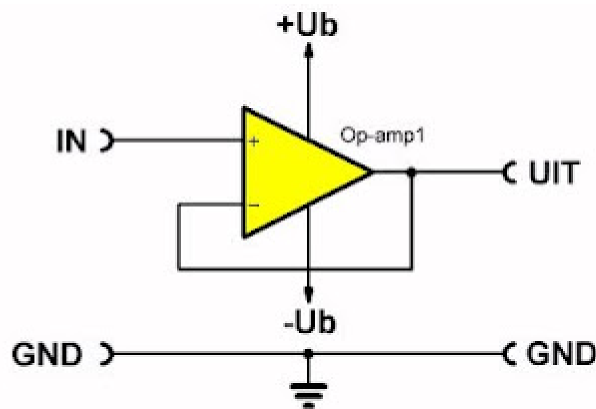


Het schema van een transistorbuffer met superieure eigenschappen. (© 2018 Jos Verstraten)

Bufferversterkers met op-amp's

De eenvoudigste schakeling

Het eenvoudige basisschema van een bufferversterker met een op-amp is getekend in onderstaande figuur. Het ingangssignaal wordt rechtstreeks aangeboden aan de niet-inverterende ingang van de op-amp. De inverterende ingang gaat rechtstreeks naar de uitgang. De werking van de schakeling is gemakkelijk te begrijpen als u rekening houdt met een van de basiseigenschappen van een teruggekoppelde operationele versterker. De schakeling zal zichzelf steeds zó instellen dat de spanning op de inverterende ingang gelijk wordt aan de spanning op de niet-inverterende ingang. Het zal dan onmiddellijk duidelijk zijn dat dit tot gevolg heeft dat de uitgangsspanning gelijk wordt aan de ingangsspanning.

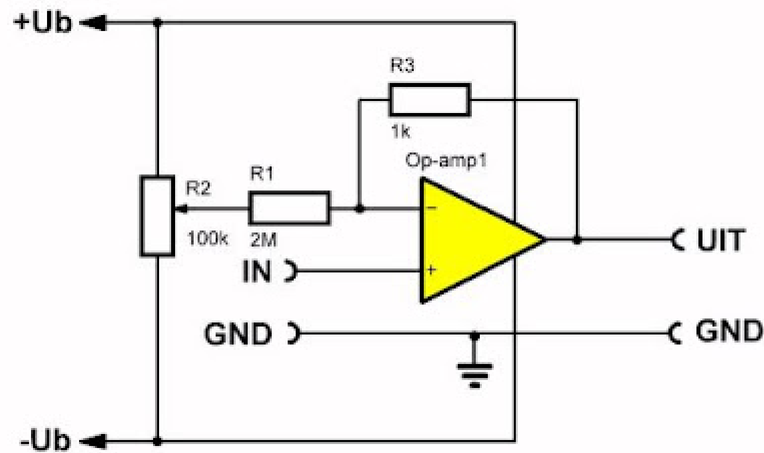


Het basisschema van een bufferversterker met op-amp.
(© 2018 Jos Verstraten)

Zeer hoge ingangsweerstand
Deze schakeling heeft een zeer hoge ingangsweerstand. Tussen beide ingangen van de op-amp kunt u een denkbeeldige weerstand veronderstellen. Deze weerstand bepaalt in hoge mate de ingangsweerstand van de bufferversterker. Nu staat er aan beide aansluitingen van deze weerstand dezelfde spanning. Het gevolg is dat er geen stroom door de weerstand vloeit en dat de ingangsweerstand dus in principe oneindig is. In principe, omdat er in een praktische schakeling wel iets minder versterkt wordt dan de eenheid. Een praktische waarde voor de spanningsversterking is 0,995. Er bestaat dus toch een heel klein spanningsverschil tussen beide ingangen en er vloeit dus ook een zeer kleine stroom door de interne weerstand tussen beide ingangen. Deze kleine stroom is er de oorzaak van dat de ingangsweerstand niet oneindig is, maar zeer groot. Zelfs met een normale bipolaire op-amp zoals een 741 zijn waarden in het GΩ-bereik te realiseren.

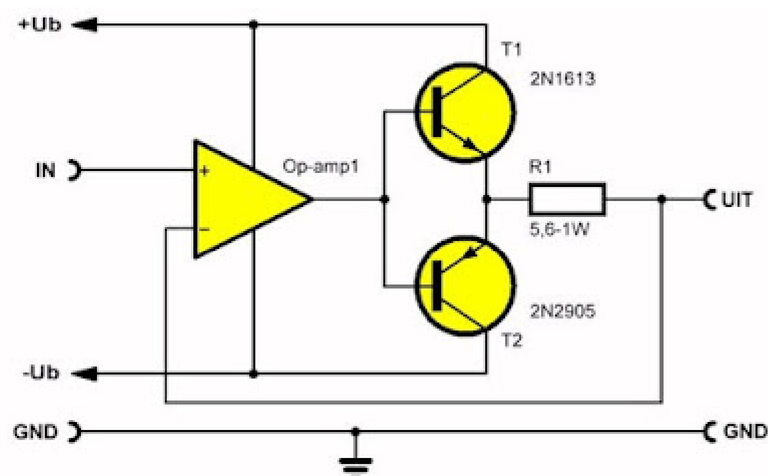
Zeer lage uitgangsweerstand
Ook de zeer lage uitgangsweerstand volgt uit de spanningsgelijkheid tussen beide ingangen. Als de schakeling belast wordt, dan zal er een spanning vallen over de inwendige weerstand van de op-amp zélf. Het gevolg is dat de uitgangsspanning zou willen gaan dalen. Maar daar deze spanning rechtstreeks wordt teruggekoppeld naar de niet-inverterende ingang zou er dan een spanningsverschil tussen de twee ingangen ontstaan. De op-amp zal nu onmiddellijk reageren door dit spanningsverschil te versterken. Het gevolg is dat de spanningsgelijkheid tussen de twee ingangen wordt hersteld en de uitgangsspanning dus weer gelijk wordt aan de ingangsspanning. Voor de buitenwereld lijkt het er op alsof de op-amp een zeer lage uitgangsweerstand heeft.

Offset-compensatie bij de bufferversterker
Op-amp's hebben een vervelende eigenschap en dat is een bepaalde mate van offset. Dat wil zeggen dat de uitgangsspanning toch niet gelijk aan nul zal zijn als er geen spanningsverschil aanwezig is tussen beide ingangen. Als uw op-amp geen pennen heeft voor de compensatie van dit verschijnsel moet u gebruik maken van een externe offset-compensatie. Een bruikbaar schema daarvoor is getekend in onderstaande figuur.
De inverterende ingang wordt via een hoge weerstand R1 verbonden met de loper van een veel laag-ohmiger instelpotentiometer R2. Deze loper is geschakeld tussen de voedingsspanningen van de versterker. Het instelbereik van deze compensatie wordt gegeven door de uitdrukking:
$U_{offset} = \pm[U_b \bullet (R3 / R1)]$
Overigens hebt u bij een bufferversterker niet erg veel last van de offset. Vanwege de rechtstreekse terugkoppeling tussen uitgang en inverterende ingang is de spanningsversterking gelijk aan een. Ook de offsetspanning wordt dus niet versterkt, zodat u alleen te maken hebt met de eigen onversterkte offset van de toegepaste op-amp. Deze ligt in het mV-bereik!



Het compenseren van de offset bij de bufferversterker. (© 2018 Jos Verstraten)

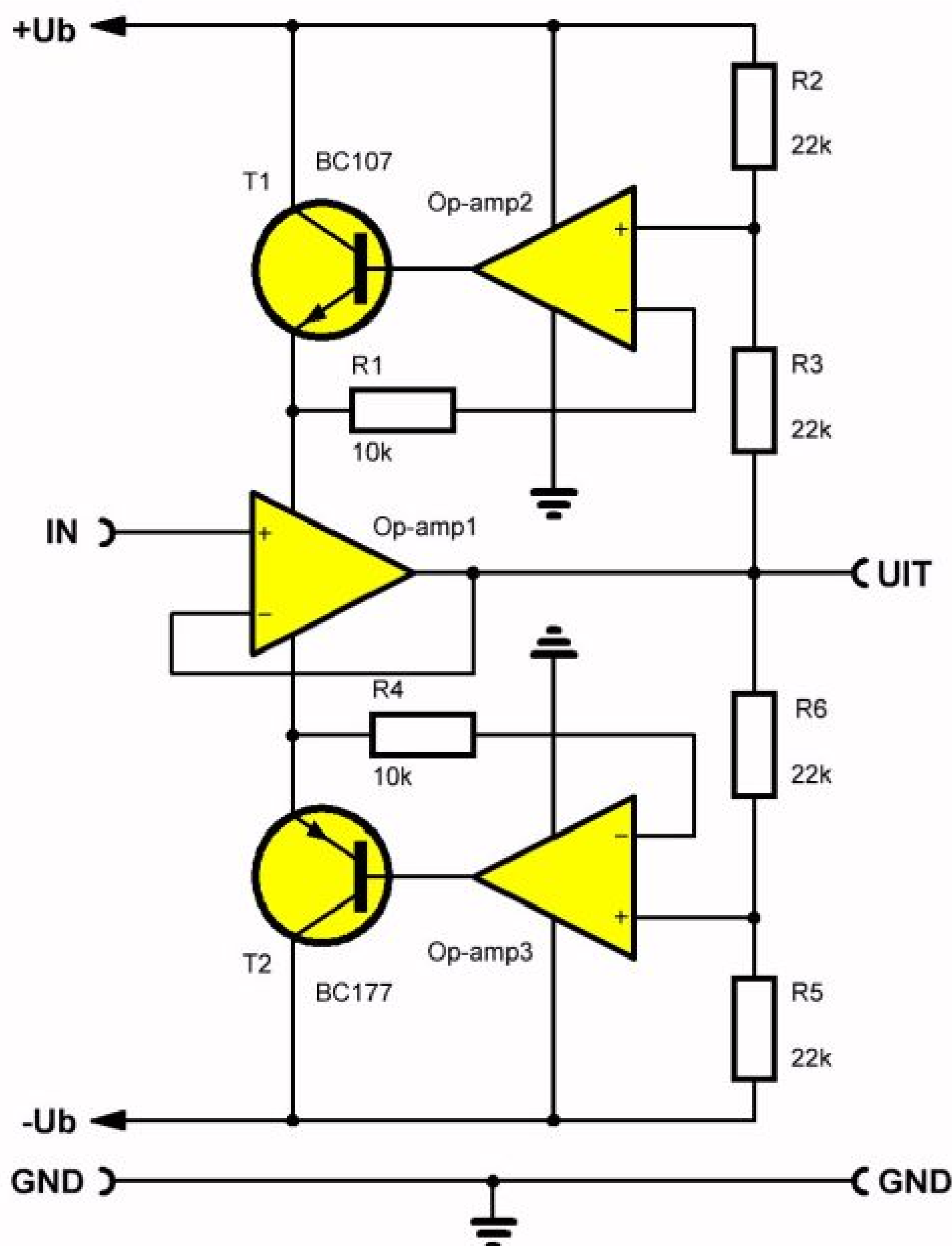
Vergroten van de uitgangsstroom
Hoewel een op-amp een zeer lage uitgangsweerstand heeft, is hij toch niet in staat veel stroom te leveren. Als dat wél noodzakelijk is, al is het maar voor het sturen van een hoofdtelefoon, dan moet u de uitgang van de op-amp extra bufferen. Een zeer bruikbaar en eenvoudig schema is getekend in onderstaande figuur. De uitgang van de op-amp wordt rechtstreeks aangesloten op de twee basissen van complementaire transistoren T1 en T2. Ook de emitters zijn rechtstreeks met elkaar verbonden. Tussen de emitters en de uitgang staat een kleine weerstand. De uitgang wordt rechtstreeks teruggekoppeld naar de inverterende ingang van de operationele versterker.
Het geheel vormt een buffer met een versterking van 1, maar met een stroomcapaciteit van ongeveer ±100 mA. Door de maximale terugkoppeling is de schakeling uiterst stabiel en bruikbaar over de gehele audio-frequentieband. De uitgangsweerstand is, dank zij de tegenkoppeling, verwaarloosbaar klein.



Het vergroten van de uitgangsstroom van een op-amp buffer. (© 2018 Jos Verstraten)

Vergroten van de uitgangsspanning
Op-amp's hebben een beperkter spanningsbereik dan transistoren. Met een BC107 kunt u zonder problemen een bufferversterker maken die u uit een spanning van +50 V kunt voeden. Dat lukt met een normale op-amp niet. De meeste operationele versterkers kunnen gevoed worden uit een maximale spanning van 36 V. Werkt u symmetrisch, dan betekent dit dat u de schakeling uit maximaal ±18 V kunt voeden. Dat heeft tot gevolg dat de bufferversterker geen signalen kan verwerken die een grotere top-tot-top waarde hebben dan ongeveer 30 V. Wilt u grote signalen met een bufferversterker met op-amp verwerken, dan kan dit door gebruik te maken van *'bootstrapping van de voeding'*. Het principe is getekend in onderstaande figuur. Op-amp1 is de op-amp die wordt gebruikt als bufferversterker. De voedingsaansluitingen gaan niet rechtstreeks naar de $+U_b$ en de $-U_b$, maar via transistoren. Deze transistoren worden gestuurd uit twee hulp op-amp's. De bovenste hulp op-amp wordt gevoed tussen de $+U_b$ en de massa, de onderste tussen de massa en de $-U_b$. U kunt nu de voedingsspanningen

verhogen tot ±36 V. Voor de twee hulp op-amp's geldt dat deze dan ieder 36 V voedingsspanning te verwerken krijgen, hetgeen toelaatbaar is.
Hoe dat zit met de hoofd op-amp moet even bekeken worden. Stel dat u aan de spanningsvolger een spanning van 0 V aanlegt. De uitgang zal dan ook op 0 V staan. De niet-inverterende ingang van de bovenste hulp op-amp is via een spanningsdeler R2/R3 ingesteld op de helft van de positieve voedingsspanning. De schakeling zal zichzelf nu zo inregelen dat dezelfde spanning op de inverterende ingang staat. Dat kan alleen als de positieve voedingsspanning van de hoofd op-amp op de helft van de positieve voedingsspanning staat, dus op +18 V! Deze spanning wordt immers rechtstreeks teruggekoppeld naar de inverterende ingang van de bovenste hulp op-amp.
Hetzelfde verhaal geldt voor de negatieve voedingsaansluiting van Op-amp1. Deze staat op een spanning van -18 V.



Het vergroten van de uitgangsspanning van een op-amp buffer.
(© 2018 Jos Verstraten)

De situatie verandert dramatisch als er op de ingang van de buffer een signaal wordt gelegd. Stel dat u +5 V op de ingang zet. De uitgang zal ook naar +5 V gaan. De spanningsdelers naar de ingangen van de twee hulp op-amp's worden nu anders ingesteld. De bovenste staat nu tussen +36 V en +5 V, zodat er over de deler maar 31 V staat. Over iedere weerstand valt 15,5 V, het gevolg is dat de niet-inverterende ingang nu wordt ingesteld op +20,5 V. Het regelsysteem zorgt ervoor dat dit ook de spanning wordt op de positieve voedingsaansluíting

van de hoofd op-amp. Bij de onderste spanningsdeler staat er nu 41 V over de weerstanden. Over iedere weerstand valt 20,5 V, zodat de niet-inverterende ingang van de onderste hulp op-amp op een spanning van -15,5 V komt te staan. Door het onderste regelmechanisme wordt dat ook de spanning op de negatieve voedingsaansluiting van Op-amp1.
De op-amp van de bufferversterker wordt nu niet gevoed tussen +18 V en -18 V, maar tussen +20,5 V en -15,5 V. Hoewel de totale voedingsspanning nog steeds 36 V bedraagt heeft het voedingsbereik zich positief verschoven. De voedingsspanning verplaatst zich dus in de richting van de grootte en de polariteit van het ingangssignaal. Op deze manier kunt u de op-amp veel verder uitsturen, omdat in het ultieme positieve geval Op-amp1 gevoed wordt tussen +36 V en 0 V en in het ultieme negatieve geval tussen 0 V en -36 V.